

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

MĚŘICÍ AUDIO PŘEDZESILOVAČ PRO KOMUNIKÁTOR

PRECISION AUDIO PREAMPLIFIER FOR HEADSET MEASUREMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Šimek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Hanák, Ph.D.

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Audio inženýrství**
specializace Zvuková produkce a nahrávání
Ústav telekomunikací

Student: Michal Šimek

ID: 203748

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Měřicí audio předzesilovač pro komunikátor

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte mikrofonní a sluchátkové měřicí předzesilovače pro mikrotelefon a náhlavní sadu (komunikátor). Budou sloužit jako součást simulátoru hlavy Bruel&Kjar 4128D, proto se pokuste dosáhnout co nejnižšího šumu a vyrovnané kmitočtové charakteristiky. Předzesilovače musí také splňovat požadavky na elektrické rozhraní stanovené v doporučení ITU-T Rec. P.381 (08/2012). Předzesilovače musí být vybaveny konektory RJ11 a jack 3,5 mm pro připojení obou typů komunikátorů. Napájení musí být možné z baterie i z externího zdroje stejnosměrného napětí s ochranou proti přepólování. Signálové vstupy a výstupy opatřete ochranami a VF filtry. V systému Autodesk Eagle navrhněte desky plošného spoje, které pak zamontujte do vhodné kovové skříňky. Pomocí analyzátoru Audio Precision APx525 na všech zesilovačích proveďte měření reálně dosažených parametrů a porovnejte s požadavky normy. Nakonec vyrobte vhodné popisky pro čelní i zadní panel zesilovače.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] International Communication Union, Recommendation ITU-T P.381: Technical requirements and test methods for the universal wired headset or headphone interface of digital mobile terminals. Series P: Terminals and Subjective and Objective Assessment Methods, Voice Terminal Characteristics, 08/20012.
- [2] SELF, D. Small Signal Audio Design. Focal Press, 2010. ISBN 978-0-240-52177-0.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 8.6.2020

Vedoucí práce: Ing. Pavel Hanák, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Bakalářská práce řeší mikrofonní a sluchátkový předzesilovač pro mikrotelefon a náhlavní sadu. Návrh musí splňovat požadavky na elektrické rozhraní stanovené v doporučení ITU-T Rec. P.381(08/2012). Součástí návrhu je napěťový měnič, předpětí pro mikrotelefon a napájení (z baterie i z externího zdroje). V rámci práce je také popsán návrh plošného spoje a řešení nízkého šumu v celém obvodu. Cílem práce je navrhnout, sestavit a následně zasadit laboratorní přípravek do kovové krabičky. Nakonec přípravek změřit na analyzátoru audio precision APx525.

Klíčová slova

Předzesilovač, šum, plošný spoj, operační zesilovač, napájení, nízkošumový návrh, EAGLE

Abstract

This thesis deals with microphone and headphone preamplifier for microtelephone and headset. The design shall meet the electrical interface requirements set out in ITU-T Rec. P.381(08/2012). The design includes a voltage converter, microtelephone bias and both a battery and an external power supply. In this work is also described the design of printed circuit board and the solution of a low noise in the whole circuit. The aim of this thesis is to design, built and embed the laboratory fixture into a metal box. Finally, measure the product on an APx525 audio precision analyzer.

Keywords

Preamplifier, noise, printed circuit board, operational amplifier, power supply, low noise design, EAGLE

Bibliografická citace

ŠIMEK, Michal. *Měřicí audio předzesilovač pro komunikátor* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125874>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Pavel Hanák.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Měřicí audio předzesilovač pro komunikátor“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s jejím vytvořením jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nepovoleným způsobem do cizích osobnostních autorských práv a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 15.12 2019

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrální práce Ing. Petru Hanákovi, Ph.D. za pevné nervy, odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 8.6 2020

.....

podpis autora

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Požadavky a rozbor doporučení ITU-T REC. P381 (08/2012).....	10
3	Předzesilovač.....	10
4	Operační zesilovač	11
4.1	Invertující zesilovač	12
4.2	Neinvertující zesilovač	12
4.3	Napěťový sledovač	13
5	Šum.....	13
5.1	Barvy šumu	14
5.2	Johnsonův šum.....	14
5.3	Výstřelový šum	14
5.4	Kmitavý šum.....	15
5.5	Praskavý šum	15
5.6	Šum v rezistorech.....	15
5.7	Šum v operačních zesilovačích.....	15
5.8	Výpočet šumu v zapojení s neinvertujícím zesilovačem	16
6	Návrh obvodu.....	17
6.1	Napájecí obvody a ochranné obvody	17
6.2	Schottkyho diody na ochranu proti zpětnému proudu	17
6.3	Návrh LC filtru na napájecí vstupy operačních zesilovačů	18
6.4	Inverzní měnič napětí.....	19
6.5	Předpětí pro mikrofon pomocí LP38798	20
6.6	Zesilovač pro mikrofon.....	20
6.7	Výběr zesilovače pro mikrofon.....	21
6.8	AD797.....	22
6.8.1	Výpočet šumu mikrofonního zesilovače	23
6.9	Sluchátkový zesilovač.....	24

6.10	Zesilovač NE5532	24
7	Návrh desky	26
7.1	Deska plošného spoje dolní patro.....	27
7.2	Deska plošného spoje horní patro	28
8	Sestrojování zařízení.....	29
8.1	Problémy při oživování přípravku.....	29
8.2	Vložení do krabičky a úprava čelního panelu	30
9	Měření pomocí analyzátoru Audio Precision APx525.	31
9.1	Měření sluchátkového předzesilovače.....	32
9.2	. Měření mikrofonního předzesilovače.....	33
10	Závěr	35

Seznam obrázků

Obrázek 1: Operační zesilovač	11
Obrázek 2: blokové schéma zpětné vazby	11
Obrázek 3: Invertující zesilovač	12
Obrázek 4: Neinvertující zesilovač	12
Obrázek 5: Napěťový sledovač	13
Obrázek 6: Šumový model rezistoru	15
Obrázek 7: Šumový model operačního zesilovače	16
Obrázek 8: Výpočet šumu v OZ	16
Obrázek 9: Charakteristika Schottkyho diody <i>VS-10BQ015HM3[9]</i>	18
Obrázek 10: LC filtr	18
Obrázek 11: Zapojení LTC3261	19
Obrázek 12: LDO zapojení	20
Obrázek 13: Blokové schéma mikrofonního zesilovače	21
Obrázek 14: Zapojení pro mikrofon	22
Obrázek 15: sluchátkový zesilovač	24
Obrázek 16: zapojení NE5532	25
Obrázek 17: Krabice Hammond	26
Obrázek 18: osazovací plán dolní patro	27
Obrázek 19: Osazovací plán horní patro	28
Obrázek 20: Ochrana vstupu	29
Obrázek 21: Čelní panel	30
Obrázek 22: Zadní panel	30
Obrázek 23: Zasazení do krabice	31
Obrázek 24: změřená frekvenční charakteristika sluchátkového zesilovače	32
Obrázek 25: změřená výsledná úroveň výstupního šumu sluchátkového zesilovače	33
Obrázek 26: frekvenční charakteristika mikrofonního zesilovače	33
Obrázek 27: Výsledná úroveň šumu mikrofonního zesilovače	34
Obrázek 28: Harmonické zkreslení mikrofonního zesilovače	34
Obrázek 29: fázová charakteristika mikrofonního zesilovače	34

1 Úvod

Tématem této bakalářské práce je návrh a zhotovení měřicího předzesilovače pro headset, který bude používán k jedné z laboratorních úloh, kde bude zesilovat signály z mikrofonu a následně je posílat do počítače. Součástí je i druhý předzesilovač vedoucí do reproduktoru sluchátek. Jelikož se jedná o měřicí zařízení, je jeden z hlavních parametrů extrémně nízký šum výstupního signálu předzesilovače. Ve své bakalářské práci se zabývám i dalšími důležitými vlastnostmi na základě doporučení ITU-T Rec. P.381 (08/2012).

V úvodu práce je rozebráno výše uvedené doporučení. V další kapitole je popsána nezbytná součást této práce, teorie operačních zesilovačů. Následuje kapitola o šumech, rozbor nízkošumového zapojení předzesilovače a výpočet výstupního šumu operačního zesilovače. Jsou zde rozebrány jednotlivé bloky obvodu s jejich konkrétními součástkami a je zde uveden důvod, proč byly vybrány. Na konci je navržen samotný obvod s návrhem DPS v programu Eagle, osazení součástek a realizace. Na konci bakalářské práce je popsána realizace samotného přípravku a zasazení do kovové krabičky, následné měření na analyzátoru Audio Precision APx525 a porovnání dosažených výsledků oproti teoretickým, které jsou popsány v doporučení ITU-T Rec. P.381 (08/2012).

2 Požadavky a rozbor doporučení ITU-T REC. P381 (08/2012)

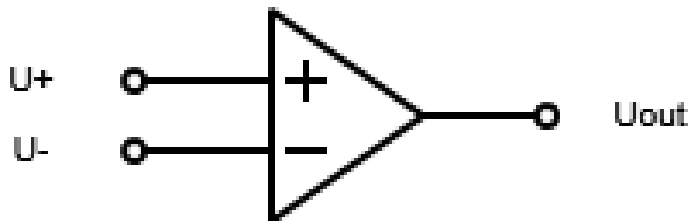
Tento dokument udává fyzikální a elektroakustické vlastnosti a specifikuje odpovídající zkušební metody pro analogový headset. Jeho účelem je zajistit odpovídající kompatibilitu mezi headsetem a digitálním terminálem, a také univerzální možnost výběru libovolného analogového headsetu. Toto doporučení není určeno pro digitální headsety. Parametry na předzesilovače pro reproduktor a mikrofon jsou pro mě v tomto dokumentu důležité. Podle doporučení musí mít předzesilovač mikrofonu výstupní impedanci menší než $2\ \Omega$, maximální výstupní napětí $150\text{ mV} \pm 1\text{ mV}$, při odporu velikosti $32\ \Omega$. Mikrofon požaduje předpětí $2,6\text{ V} \pm 1\%$. Odpor tohoto předpětí musí být $2,2\text{ k}\Omega \pm 2\%$. Nominální citlivost musí být -60 dBV . Předzesilovač pro reproduktor musí mít výstupní impedanci menší než $1\text{ k}\Omega$. Dynamický rozsah musí být dostatečný pro výstup mobilního terminálu. Celková úroveň výstupního šumu musí být menší než -90 dBV . [1]

3 Předzesilovač

Předzesilovač je zařízení, které má za úkol zesílit vstupní signál na úroveň, kterou požadují prvky jako např. sluchátka, mikrofon, zesilovač. U předzesilovače jsou důležitými parametry šum, vstupní impedance a zkreslení signálu. Jelikož se jakákoli nedokonalost projeví na výstupu a ovlivní následující prvky, je téměř nemožné poté odstranit případné nedokonalosti. Jakákoliv úroveň šumu se v předzesilovači zesílí, proto musíme již při návrhu předzesilovače dbát na nízkou úroveň šumu na vstupu. Vstupní impedance by měla být co největší, protože když nebude dostatečně velká, bude zatěžovat zdroj signálu. Důležitým parametrem je také šířka přenášeného pásma. [2]

4 Operační zesilovač

Operační zesilovač je polovodičová elektronická součástka, která se vyrábí v integrovaném provedení. Je to jedna z nejpoužívanějších součástek v analogových obvodech. Funguje jako diferenční napěťový zesilovač s velkým zesílením. Výstupní napětí je zde dáno rozdílem vstupních napětí vynásobeným zesílením. Zesilovač je na Obrázek 1.



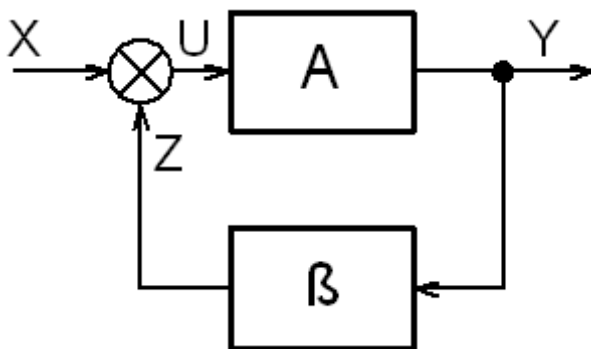
Obrázek 1: Operační zesilovač

$$u_{out} = A(u_{+} - u_{-}) \quad (4.1)$$

Pro výpočty a základní zapojení se používají ideální vlastnosti:

- **Vstupní impedance** je nekonečně velká, tím pádem jsou vstupní proudy rovny nule.
- **Vstupní napětí** je rovno nule a je nezávislé na vstupním proudem.
- **Zesílení** je rovno nekonečnu bez ohledu na kmitočet.
- **Výstupní impedance** je rovna nule, tudíž zesílení nezáleží na zátěži.

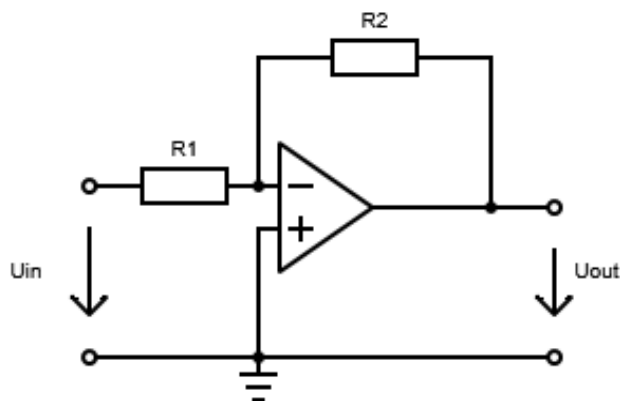
Reálný operační zesilovač ovšem nedosahuje těchto parametrů, proto je potřeba zavést zpětnou vazbu. V audiozařích se nejčastěji používá záporná zpětná vazba. Tato vazba snižuje napěťové zesílení, zvyšuje šířku přenášeného pásma a vstupní impedanci, naopak snižuje výstupní impedanci a zkreslení. Na Obrázek 2 vidíme blokové schéma. [2]



Obrázek 2: blokové schéma zpětné vazby

$$\frac{Y}{X} = \frac{A}{1 - \beta A} \quad (4.2)$$

4.1 Invertující zesilovač

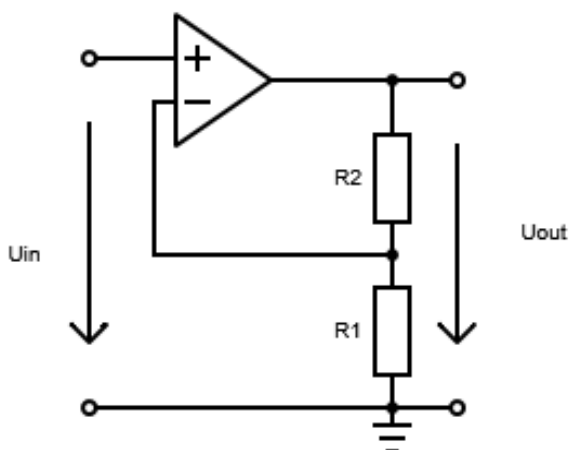


Obrázek 3: Invertující zesilovač

Na Obrázek 3 vidíme invertující zapojení s operačním zesilovačem. Je zde zavedena paralelní napěťová zpětná vazba přes odpor R_2 . Vstupní odpor je roven odporu R_1 . Zpětná vazba snižuje výstupní odpor, který se tím pádem blíží nule. V ideálním modelu by byl výstupní odpor roven nule. Napěťové zesílení je dáno tímto vztahem: [2]

$$A = -\frac{R_2}{R_1} \quad (4.1)$$

4.2 Neinvertující zesilovač



Obrázek 4: Neinvertující zesilovač

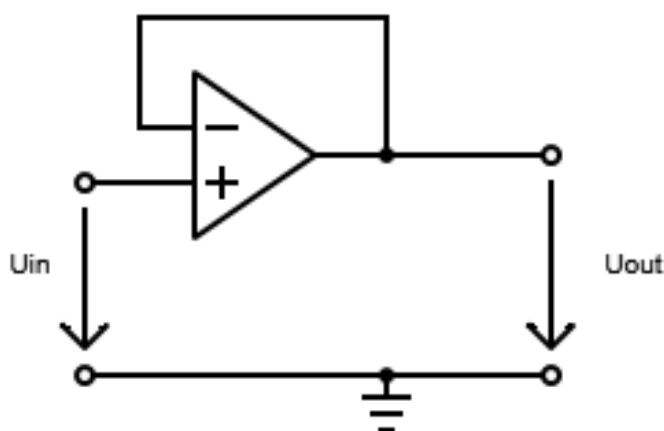
Na Obrázek 4 vidíme neinvertující zapojení s operačním zesilovačem. Je zde zavedena sériová napěťová zpětná vazba. Vstupní odpor je roven vnitřnímu odporu operačního zesilovače, tudíž

je teoreticky nekonečný. Když vezmeme v potaz reálné vlastnosti, je vstupní odpor v řádech mega ohmů. Výstupní odpor se blíží nule a stejně jako u invertujícího je snižován zpětnou vazbou. Napětové zesílení je dáno vztahem (4.2).

$$A = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (4.2)$$

4.3 Napětový sledovač

Napětový sledovač je obdobou neinvertujícího zesilovače s tím rozdílem, že jeho záporná zpětná vazba je přivedena přímo na vstup. Toto zapojení má zesílení jedna, jeho výhodou je velký vstupní odpor a také schopnost výstupu dodávat poměrně velký výstupní výkon (W).



Obrázek 5: Napětový sledovač

5 Šum

Za šum v elektrotechnice označujeme náhodné signály, které jsou generovány rezistory a aktivními prvky. V obvodech se nejčastěji vyskytuje Johnsonův šum a výstřelový šum, což jsou formy bílého šumu. Tyto dva základní mechanismy generují šum v obvodech s tranzistory. Existují i jiné formy šumu, které vznikají například při nedokonalém zpracování signálu, např. praskavý šum. Šumy jsou vzájemně nekorelovány, a tak se částečně sčítají a částečně ruší. Jejich součet je vlastně součet kvadrátu jejich efektivních hodnot pod odmocninou (5.1). [2]

$$U_{tot} = \sqrt{U_{n1}^2 + U_{n2}^2 + \dots} \quad (5.1)$$

5.1 Barvy šumu

Obecně jsou šумы rozdělčovány podle barev, které udává přibližná analogie mezi jejich frekvenčním spektrem a spektrech barevného světla. Různé barvy mají různé vlastnosti. Nejčastějším druhem šumu v elektrotechnice je Bílý šum, který se vyznačuje svou konstantní výkonovou hustotou. To znamená, že má stejnou energii ve stejných frekvenčních pásmech. Další z nejčastějších je šum růžový, kterému na rozdíl od bílého klesá energie o 3 dB při každém zdvojnásobení frekvence. To znamená, že má stejnou energii ve všech pásmech. [2]

5.2 Johnsonův šum

Johnsonův šum (neboli tepelný šum) vzniká na všech odporech, jak na reálných, tak i například na vnitřních odporech tranzistorů. Tento šum je způsoben kmitáním elektronů v daném materiálu. Je to nejčastěji vyskytující se šum a generuje největší část šumového napětí. Efektivní hodnotu napětí tohoto šumu lze spočítat podle vztahu (5.2.3).

$$v_n = \sqrt{4kTRB} \quad (5.2.1)$$

Kde T je absolutní teplota v Kelvinech, R je hodnota odporu v Ohmech, B je šířka pásma v Hertzích a k je Boltzmanova konstanta ($k = 1,380662 \times 10^{-23}$). Reálné součástky tento šum generují, kromě součástek jako jsou induktory nebo kapacity. Šumový ekvivalentní obvod je zdroj napětí v sérii s daným rezistorem. Je samozřejmě možné převést toto šumové napětí na zdroj šumového proudu, lze to jednoduše uskutečnit pomocí Theveninovy-Nortonovy transformace zdroje napětí na zdroj proudu (5.2.2). [2]

$$i_n = \frac{v_n}{R} \quad (5.2.2)$$

5.3 Výstřelový šum

Výstřelový šum vzniká vlivem náhodných změn proudu ve vodiči, jelikož proud je tok elektronů s diskretním nábojem a náhodně fluktuuje. Má charakter bílého šumu. Je popsán rovnicí (5.2.3). [2]

$$i_n = \sqrt{2qI_{dc}B} \quad (5.2.3)$$

Kde q je náboj elektronu ($q = 1,602 \times 10^{-19} C$), I_{dk} je střední hodnota proudu a B šířka pásma. Šum se zvyšuje proudem vodiče. Bývá obvykle nižší než Johnsonův šum, tudíž je ve většině případů zanedbatelný.

5.4 Kmitavý šum

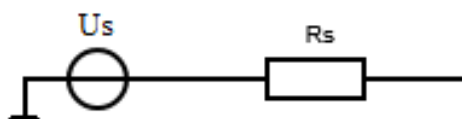
Kmitavý šum získal svůj název proto, že s poklesem frekvence se úměrně zvyšuje amplituda. Na rozdíl od Johnsonova nebo výstřelového šumu, je tento šum způsoben nedokonalostmi v zařízení. Objevuje se ve všech aktivních polovodičích, a také v odporech. [2]

5.5 Praskavý šum

Forma hluku praskavého šumu je pojmenována podle podobnosti tohoto zvuku šumu k praskání popcornu. Jedná se o typ nízkofrekvenčního šumu, který se projevuje jako nízko-úrovňové změny výstupního napětí vyskytující se v náhodných intervalech. Nejčastěji se objevují v integrovaných obvodech.

5.6 Šum v rezistorech

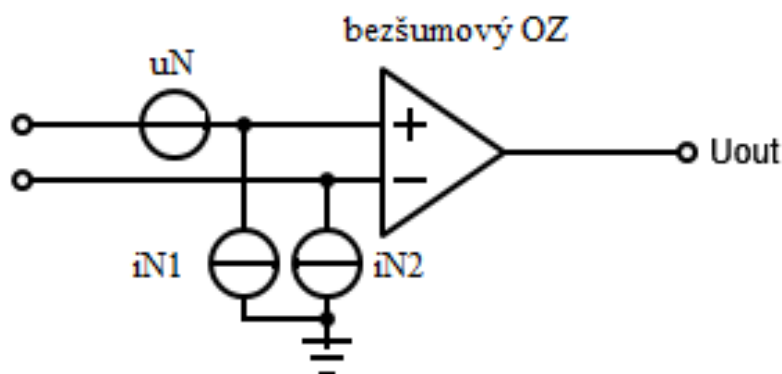
Rezistory generují bílý šum, který má často zásadní vliv na celý obvod. Vzniká na nich, jak tepelný šum zahříváním rezistorů, tak Kmitavý šum. Čím větší rezistor máme, tím větší bude výsledný šum. Náhradní obvod pro šumící rezistor je sériové zapojení zdroje šumu a rezistoru samotného Obrázek 6. [2]



Obrázek 6: Šumový model rezistoru

5.7 Šum v operačních zesilovačích

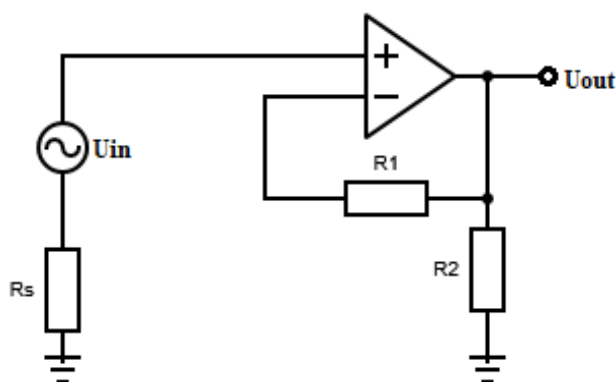
Existují obecné principy, které platí pro všechny zesilovače, ať už integrované nebo diskrétní. V reálných obvodech se přenáší šumy přes operační zesilovač ze všech prvků v obvodu. Typicky bude převažovat jeden zdroj hluku v obvodu, to však nelze považovat za samozřejmost. Je nezbytné vyhodnotit všechny zdroje, poté bude výpočet spolehlivý. Model jednoduchého šumového obvodu je vidět na Obrázek 7. Obsahuje šumový zdroj proudu a dva šumové zdroje napětí. Všechny zdroje šumu jsou nekorelované. [2]



Obrázek 7: Šumový model operačního zesilovače

5.8 Výpočet šumu v zapojení s neinvertujícím zesilovačem

Výpočet celkového šumu přenášeného na výstup operačního zesilovače závisí jak na zesilovači samotném, tak i na ostatních součástkách připojených na jeho vstup i výstup. [2]



Obrázek 8: Výpočet šumu v OZ

Nejprve musíme spočítat šum na všech rezistorech, které jsou do obvodu zapojeny podle vzorce pro Johnsonův šum (5.2.3).

Následně si najdeme v katalogu napěťový šum daného operačního zesilovače, obvykle udávaného v nV/\sqrt{Hz} , a proudový šum, který se může lišit pro kladný a záporný vstup a je udáván v pA/\sqrt{Hz} . Tato čísla jsou většinou udávána pro 1 kHz. Je potřeba vše převést na potřebnou šířku pásma. Operační zesilovač zesiluje všechny signály přivedené na vstup, proto musíme vypočítat zesílení pro jednotlivé zdroje šumu. Pro R_1 je toto zesílení 1, jelikož je přímo připojen na výstup. Pro R_2 je toto zesílení dáno poměrem (5.8.2).

$$A_{u_{R_2}} = \frac{R_1}{R_2} \quad (5.8.2)$$

Napětové zesílení je dáno vztahem (5.8.3).

$$A_u = 1 + \frac{R_1}{R_2} \quad (5.8.3)$$

Tudíž i napětový šum bude zesílen o tuto hodnotu. Proudové zesílení neinvertujícího vstupu se rovná R_1 . Pro invertující vstup, do kterého je připojena zpětná vazba je roven je napětové zesílení dáno vztahem (5.8.4).

$$A_{u_{i-}} = 1 + \frac{R_1}{R_2} \times R_s \quad (5.8.4)$$

Poté všechny zdroje šumu, zesílené spočítanými zesíleními, můžeme sečíst jako součet efektivních hodnot pomocí vztahu (5.1).

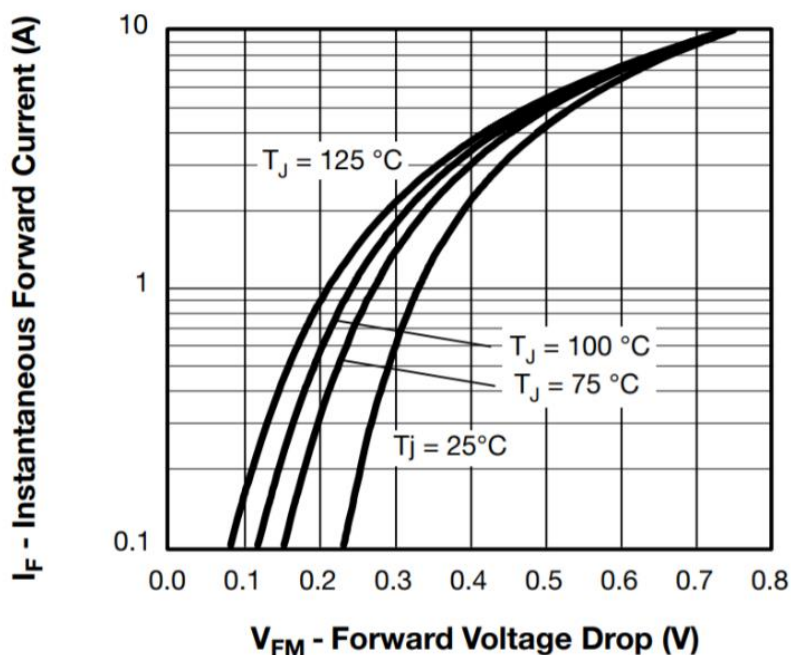
6 Návrh obvodu

6.1 Napájecí obvody a ochranné obvody

Obvod má mít možnost napájení jak z laboratorního napájecího konektoru, tak z baterie. Na vstupu obou možností jsou umístěny Schottkyho diody proti zpětnému proudu. Následuje spínač typu P-KNX125, který je uzpůsobený pro montáž do desky plošného spoje v horizontální poloze. Jako další blok je invertující měnič napětí, který mění kladné napětí, jež dodává baterie a napájecí konektor, na záporné napětí. Napětí se zápornou polaritou je důležité pro symetrické napájení operačních zesilovačů. Dalším prvkem je LDO regulátor napětí, tento regulátor je zde jako předpětí pro mikrofon. Posledním ochranným prvkem jsou LC filtry na vstupech napájení operačních zesilovačů.

6.2 Schottkyho diody na ochranu proti zpětnému proudu

Pro tuto aplikaci jsem hledal diodu s co nejmenším úbytkem napětí v propustném směru, aby dioda co nejlépe reagovala na zpětný proud při spouštění. Vybral jsem diodu VS-10BQ015HM3. Tato dioda má při 25 °C a proudu 100 mA napětí 0,2 V. To můžeme vidět na obrázku 9.



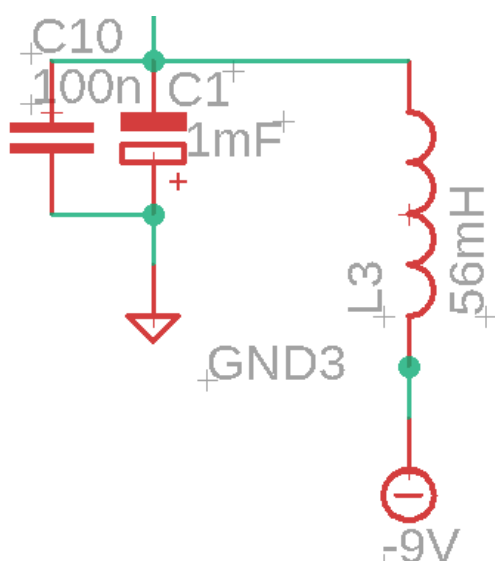
Obrázek 9: Charakteristika Schottkyho diody VS-10BQ015HM3[8]

6.3 Návrh LC filtru na napájecí vstupy operačních zesilovačů

Na vstupy operačních zesilovačů v audio aplikacích se dává LC filtr, dolní propust s co nejmenším mezním kmitočtem kvůli přeslechům a zvlnění z napájecího napětí.

Mezní kmitočet LC filtru se spočítá:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (6.3.1)$$

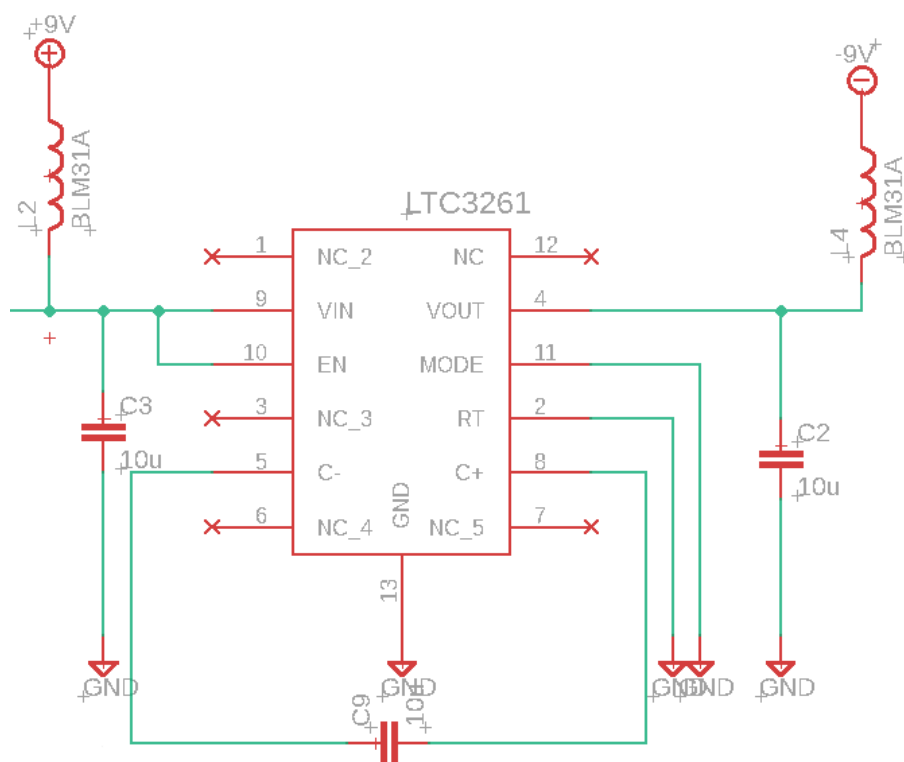


Obrázek 10: LC filtr

Při hledání vhodného kondenzátoru a cívky jsem zjistil, že bude obtížné dostat co nejmenší mezní kmitočet, jelikož, jak je ze vzorce vidět, čím větší hodnota součástek, tím menší mezní kmitočet. Kondenzátor ovšem nemohl být moc velký, aby jeho nabíjecí proud nezatížil nebo nezničil ostatní součástky v obvodu. Jak je známo, cívky se špatně integrují, bylo tudíž obtížné najít cívku s poměrně velkou indukčností a malým vnitřním odporem, aby zároveň byla dostatečně malá a vešla se do DPS. Vybral jsem kondenzátor typu EEU-F. R0J102B s kapacitou 1 mF. Paralelně k tomuto kondenzátoru je kondenzátor C_3 pro vyšší frekvence. Jeho hodnota je 100 nF. A cívku typu AISR-01563 J, která má indukčnost 56 mH. Výsledná frekvence je 21 H.

6.4 Inverzní měnič napětí

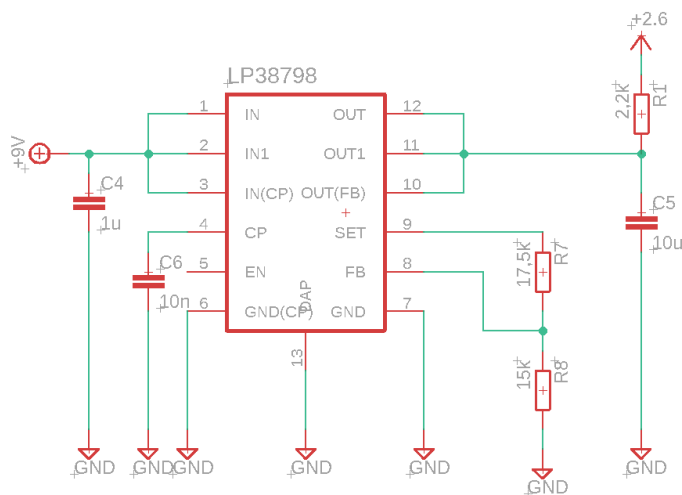
Tento měnič nám v obvodu slouží jako zdroj záporného napětí pro napájení operačních zesilovačů. Vybral jsem typ LTC3261. Pracuje v rozsahu 4,5 V až 32 V a je schopen dodávat až 100 mA. Obvod může fungovat v několika módech a má nastavitelný oscilátor od 50 kHz do 500 kHz. Pro naše potřeby je vhodné použít takzvaný Burst mode s nejvyšší možnou frekvencí oscilátoru, kdy má klidovou spotřebu pouze 60 uA. Toto opatření je nutné, protože při nižší frekvenci by nám mohl měnič pouštět rušení do slyšitelného spektra a tím rušit signál. Na obrázku je vidět zapojení tohoto měniče. Obvod je zapojený podle doporučení v katalogu. Uzemněním vývodu RT je nastavena frekvence na 500kHz. Na vstupu a výstupu jsou připraveny pájecí plošky pro feritové korálky L2 a L4. [6]



Obrázek 11: Zapojení LTC3261

6.5 Předpětí pro mikrofon pomocí LP38798

LP38798 je nízko-šumový regulátor napětí LDO. V této práci je využit jako předpětí pro mikrofon, který napájí mikrofon 2,6 V. Pracuje s poměrně širokým rozsahem vstupního napětí, 3 V až 20 V. Na výstupu je zapojen rezistor R_1 s hodnotou 2,2 k Ω , který je požadován v doporučení rozebraném v bodě 2. [6]



Obrázek 12: LDO zapojení

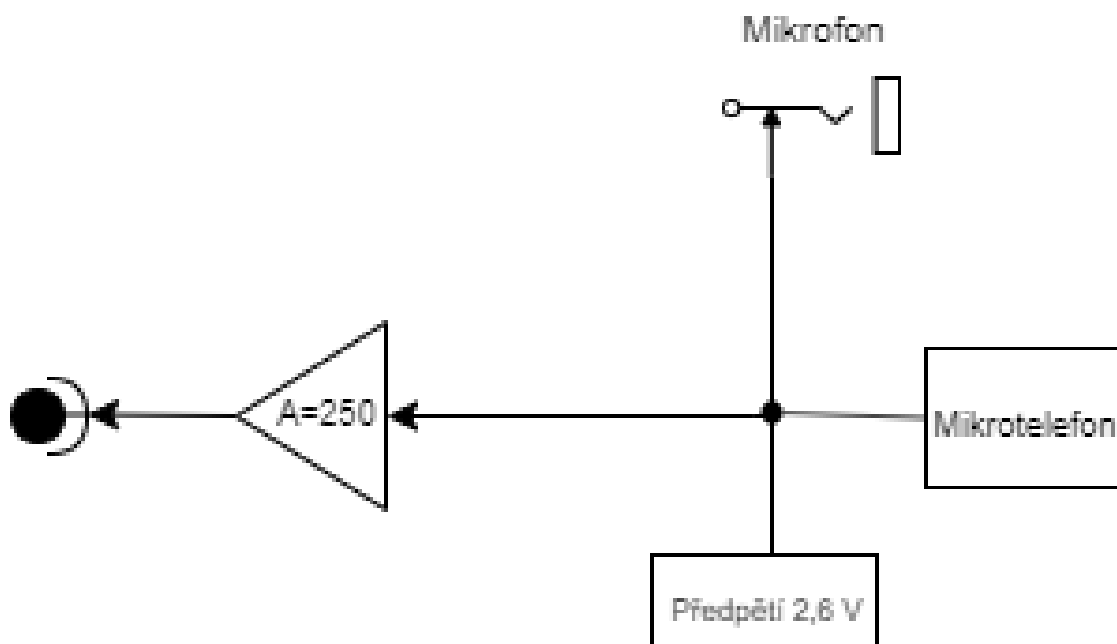
Na obrázku je zapojení, které je doporučeno podle katalogu. Napětí 2,6 V je nastaveno rezistory R_7 a R_8 . Z katalogu jsem si přečetl, že rezistor R_8 nesmí být menší než 12,9 k Ω . Rezistor R_1 se vypočítá:

$$R_7 = R_8 \times ((V_{out} / V_{FB}) - 1) \quad (6.5.1)$$

Maximální napětí zpětné vazby je $V_{FB} = 1,2$ V, naše výstupní napětí dosadíme $V_{out} = 2,6$ V. Tím vypočítáme odpor R_7 . [6]

6.6 Zesilovač pro mikrofon

Zesilovač pro mikrofon musí mít velké zesílení ($A = 250$) a zároveň velmi malou úroveň šumu (-90 dBV). Pro komplikovanost výběru konkrétní součástky následuje další kapitola 6.7 o samotném výběru.



Obrázek 13: Blokové schéma mikrofonního zesilovače

6.7 Výběr zesilovače pro mikrofon

Pro samotný výběr bylo zásadní zjistit, jaký šum je v operačním zesilovači je dominantní, kdy jsem vložil vzorce z bodu 5.8 do excelu a zkoumal, jaký vliv má šumové napětí a šumové proudy. Zjistil jsem že, dominantním šum je napětový a proudový šum je skoro zanedbatelný. Hledal jsem tedy operační zesilovač s co nejmenším napětovým šumem. Následně jsem do excelu dosazoval jednotlivé parametry operačních zesilovačů a hledal ten s co nejmenším šumem.

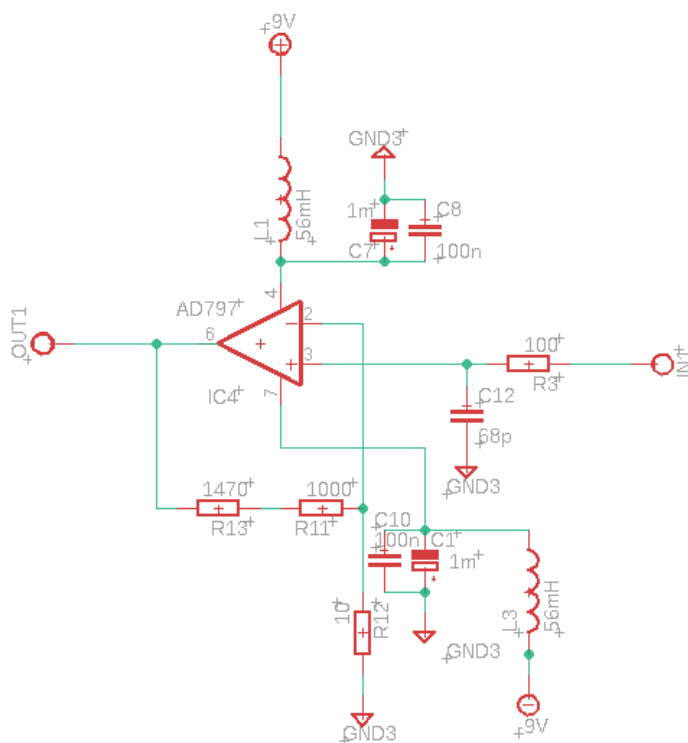
Tabulka 1: Porovnání operačních zesilovačů

Typ OZ	Napájecí napětí [V]	I_n při 1kHz (pA/ \sqrt{Hz})	V_n při 1kHz (nV/ \sqrt{Hz})
NE5532	± 22	0,7	6,0
LMH6629	$\pm 5,5$	2,6	0,7
OPA27	± 22	0,6	4,5
AD797	± 15	2,0	1,2

Z tabulky je vidět, mezi kterými operačními zesilovači jsem vybíral. LMH6629 má nejnižší napětový šum ovšem pro naši aplikaci má malý rozsah napájecího napětí. Volil jsem tedy AD797, který má sice poměrně velký proudový šum ale malý napětový, z kterým dosáhneme na malou úroveň šumu -90 dBV i v zapojení neinvertujícího zesilovače.

6.8 AD797

AD797 je operační zesilovač s velmi nízkým šumem a nízkým zkreslením, je tedy ideální pro použití jako předzesilovač. Má velmi nízký napěťový šum $1,2 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$, proudový šum $2 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ a celkově nízké harmonické zkreslení -120 dB a široký dynamický rozsah. Má rychlost přeběhu $20 \text{ V}/\mu\text{s}$ a šířku pásma 110MHz, proto se hodí pro nízkofrekvenční aplikace. Rozsah napájecího napětí je $\pm 5 \text{ V}$ až $\pm 15 \text{ V}$. [3]



Obrázek 14: Zapojení pro mikrofon

Na Obrázek 14: Zapojení pro mikrofon vidíme samotné zapojení zesilovače AD797 v neinvertujícím zapojení. Napěťové zesílení je dáno vztahem (5.2.3).

$$A_u = 1 + \frac{R_2}{R_{l2}} \quad (6.8.1)$$

Já jsem zesílení nastavil na $A_u = 250$. Rezistor R_2 byl ve schématu rozdělen na dva rezistory R_{13} a R_{11} , z důvodu lepší možnosti volby rezistorů při nastavování zesílení. Na napájecí svorky jsou připojeny LC filtry proti případným rušivým signálům ze zdroje napětí. Vstup je ošetřen filtrem dolní propust s nastaveným mezním kmitočtem 30kHz proti pronikání vysokofrekvenčního signálu.

6.8.1 Výpočet šumu mikrofonního zesilovače

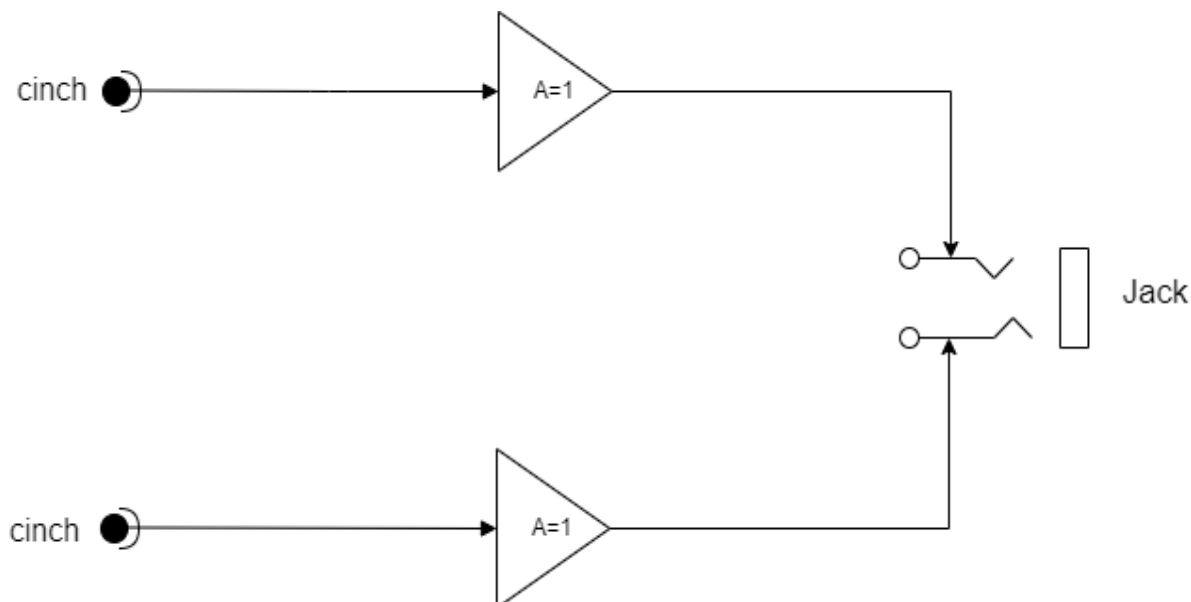
V tabulce můžeme vidět výpočty pomocí vzorců z bodu [4.8]. Pro tento konkrétní operační zesilovač nám úroveň vyšla – 90 dBV, která je požadována v doporučení v bodě 2.

Tabulka 2: Výpočet šumu

Zdroje šumu:	Hodnota ve voltech [V]	Zisk šumu v zesilovači [-]	zesílený šum [V]
Odpor zdroje	5,754998E-09	0	0,000000E+00
R2	9,081233E-07	10	9,081233E-07
R1	5,755E-08	2490	1,43299E-05
R3	0	250	0
Šum operačního zesilovače	1,69706E-07	250	4,24264E-05
Vstupní proudový šum+	2,82843E-10	0	0
Vstupní proudový šum-	2,82843E-10	2490	7,04278E-07
	výsledná úroveň šumu:	4,5E-05 [V]	
	Přepočítaná na decibely:	-90,9 [dBV]	

6.9 Sluchátkový zesilovač

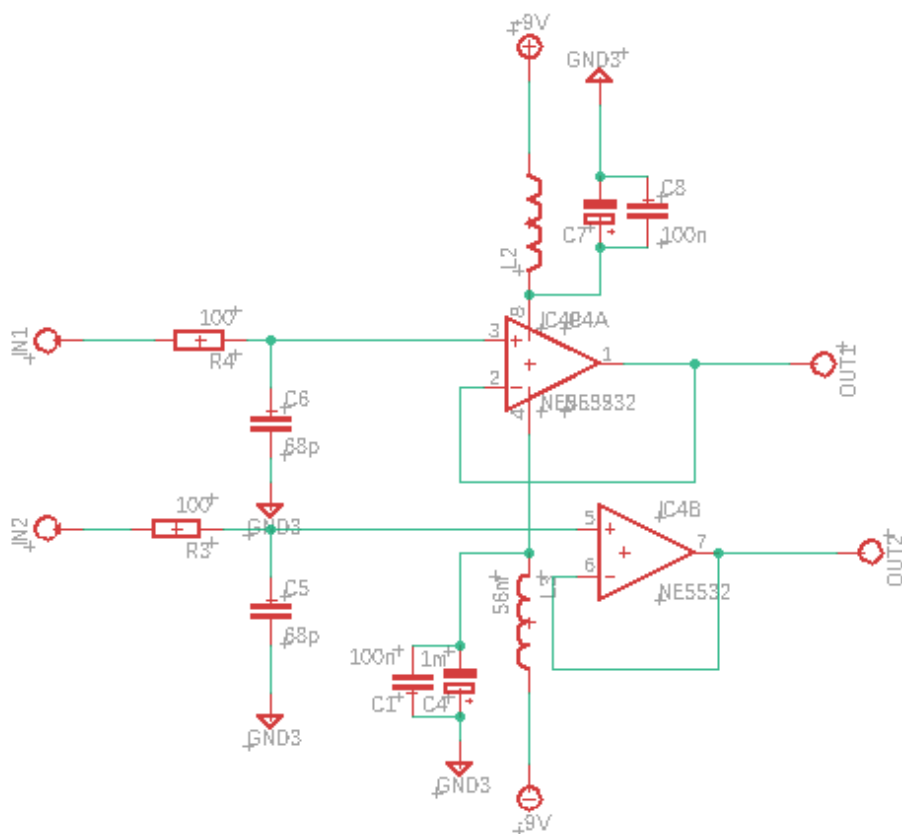
Při výběru sluchátkového zesilovače nebyla tak důležitá hodnota napětového šumu, klíčová byla hodnota výstupního proudu, který musí být dostatečně velký. Jedná se o dva zesilovače kvůli stereo přenosu se zesílením $A = 1$. Vybral jsem zesilovač NE5532.



Obrázek 15: sluchátkový zesilovač

6.10 Zesilovač NE5532

Řada zesilovačů NE5532 se vyznačuje nízkým šumem $5\text{ nV} / \sqrt{\text{Hz}}$ a nízkým harmonickým zkreslením. Díky tomuto nízkému šumovému napětí je ideální pro aplikaci předzesilovače. Při jednotkovém zesílení má šířku pásma 10 MHz bez výrazného zkreslení. Funguje při napájecím napětí $\pm 15\text{ V}$. Vstupní odpor tohoto zesilovače je velmi vysoký, tím je proudové zatížení na vstupu zanedbatelné. Má v sobě ochranné diody a ochranu proti zkratu na výstupu. Další výhodou tohoto zesilovače je jeho cena, která se pohybuje pouze v řádech desítek korun. **Error! Reference source not found.**



Obrázek 16: zapojení NE5532

Na obrázku vidíme zapojení dvojice těchto zesilovačů, které mají nastavení zesílení $A = 1$, zavedením zpětné vazby z výstupu do invertujícího vstupu. Díky zesílení 1 má toto zapojení výrazně nižší úroveň šumu na výstupu, která je pod -112 dBV. Na napájecích svorkách je obdobně jako na mikrofonním zesilovači LC filtr pro nízké frekvence, aby nedocházelo k pronikání rušivých signálů do operačního zesilovače ze zdroje. Na vstupu jsou filtry dolní propust s nastaveným kmitočtem na 30 kHz, který zabraňuje vysokofrekvenčnímu signálu proniknout do zesilovače.

7 Návrh desky

Při návrhu byl použit software eagle. Celý návrh jsem podřídil velikosti kovové krabičky, která je v zadání podmínkou. Velikost krabičky nebyl parametr zadání tudíž jsem zvolil rozměry 120 mm × 78 mm × 43 mm. Výška 43 mm, je zásadní, jelikož jsme rozdělili plošný spoj do dvou desek, které se vloží do krabičky. Krabička tedy musí být dostatečně vysoká, aby se všechny vstupní a výstupní konektory mohly dát na jednu stranu a na druhou napájecí konektor a vypínací tlačítko a vedle ještě pouzdro na baterii. Jako pouzdro na baterii jsem vybral MP000382, které je na jednu 9 V baterii.

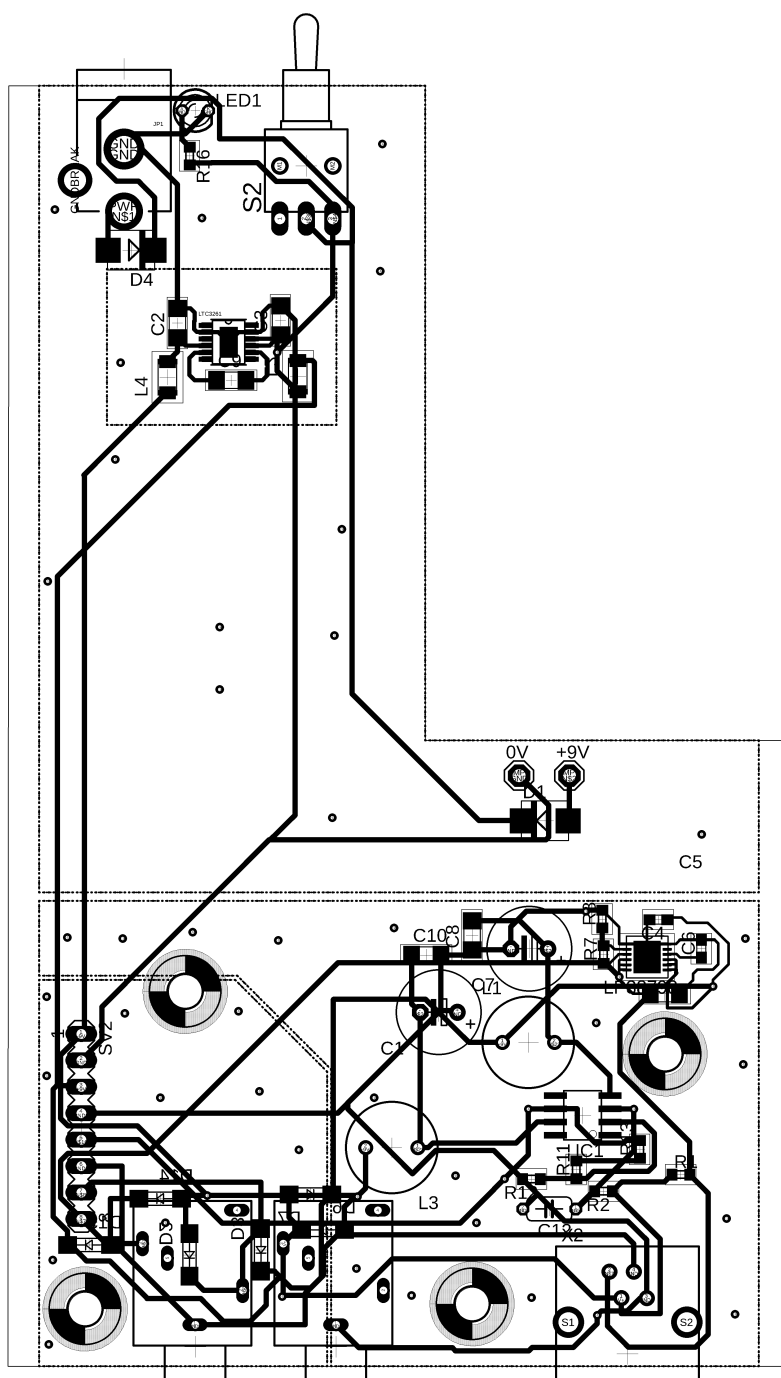
Většina součástek je v provedení SMD, pouze blokovací kondenzátory jsou v drátovém provedení. Většina jednoduchých součástek má pouzdro 0608. Při velikosti své desky jsem použil zbytečně malé součástky a zbytečně si tak přidělal práci při samotném osazování, neboť jsem mohl použít velikost pouzdra 1206.



Obrázek 17: Krabička Hammond

7.1 Deska plošného spoje dolní patro

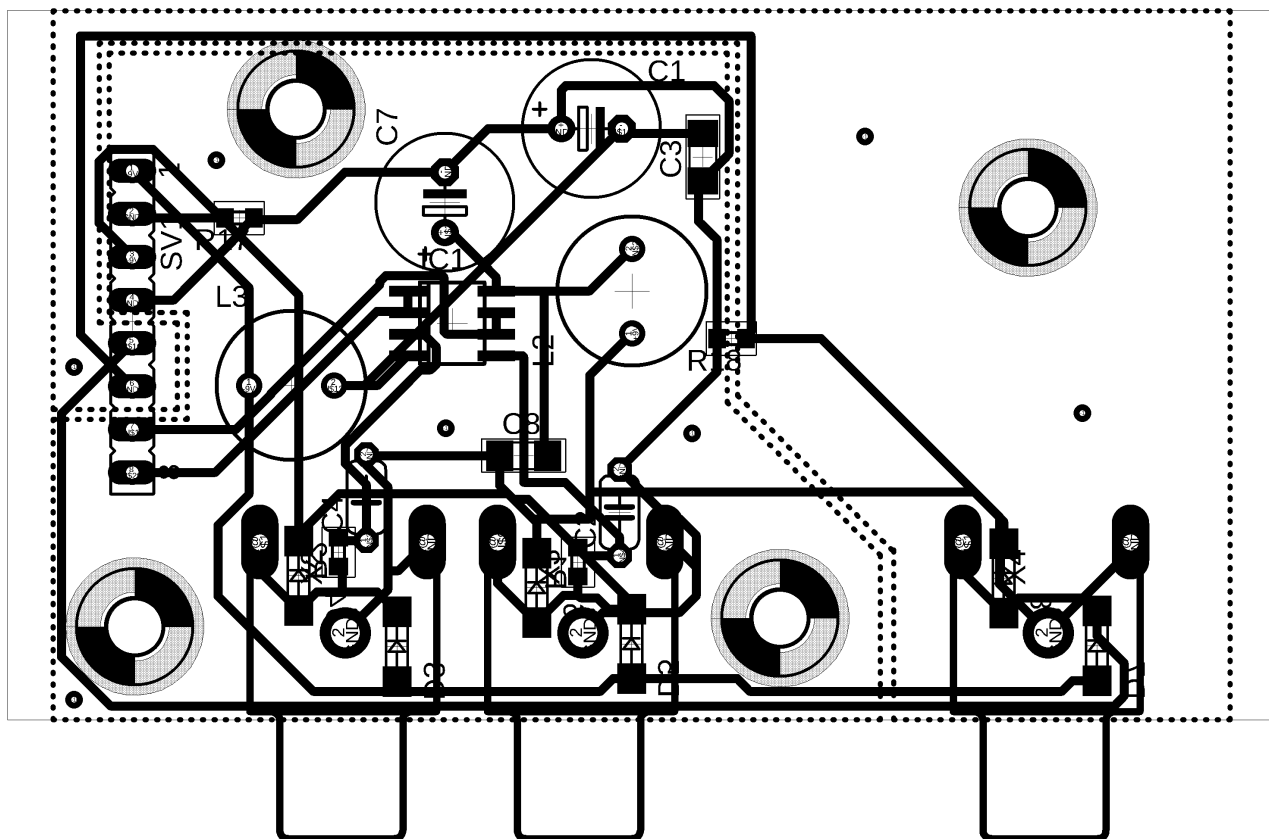
Na dolním patře je navržený napájecí konektor, vstup na baterii, spínací tlačítko, napěťový měnič, přepětí pro mikrofon a mikrofonní zesilovač. Na přední straně jsou JACK konektory a RJ11 konektor. Sluchátkové zesilovače jsou umístěné na horní desce, aby byly co nejdále od mikrofonního. Do horní desky do cinch konektoru se posílá přes propojení desek již zesílený signál, jelikož je méně náchylný na vnější rušení. Na obrázku desky samotné můžeme vidět výřez, kam se umístí bateriové pouzdro. Po okrajích je odsazený polygon, aby se vodivá vrstva nedotkla kovové krabičky. Velikost desky je 75 mm na 120 mm.



Obrázek 18: osazovací plán dolní patro

7.2 Deska plošného spoje horní patro

Z konstrukčních důvodů bylo nutné přidat druhý plošný spoj, který má rozměry 75 mm na 40 mm. Obsahuje cinch konektory, které se nevešly na spodní desku. **Zároveň obsahuje sluchátkový zesilovač, jsou zde z důvodu zamezení přeslechů, co nejdále od mikrofonního zesilovače.** Jsou zde připraveny místa pro filtry na vstupy napájecích napětí pro případ, že by přicházel rušivý signál z měniče.

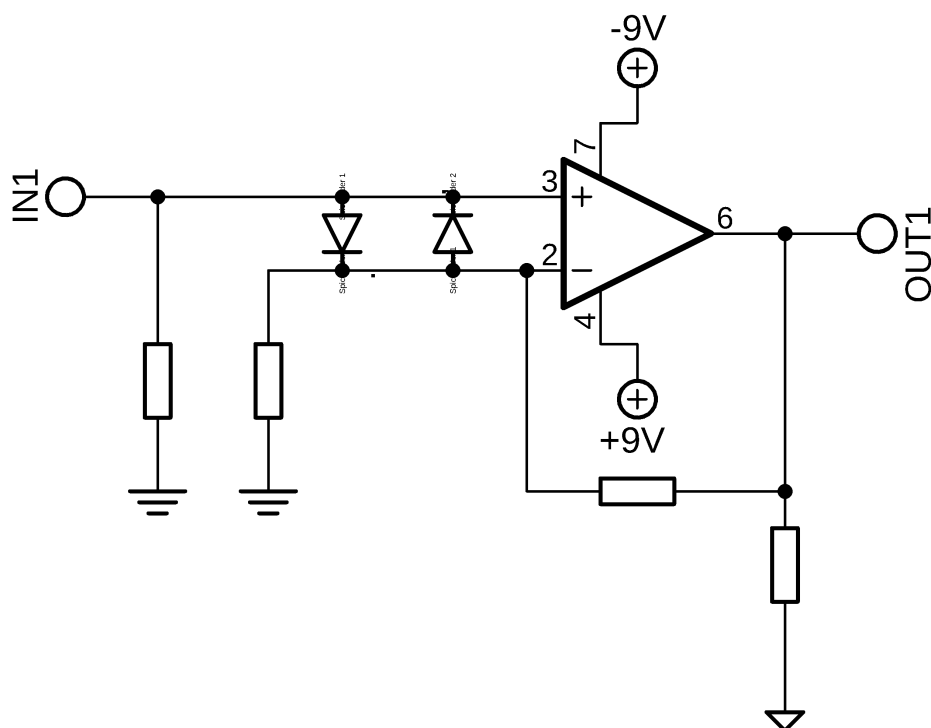


Obrázek 19: Osazovací plán horní patro

8 Sestrojování zařízení

8.1 Problémy při oživování přípravku

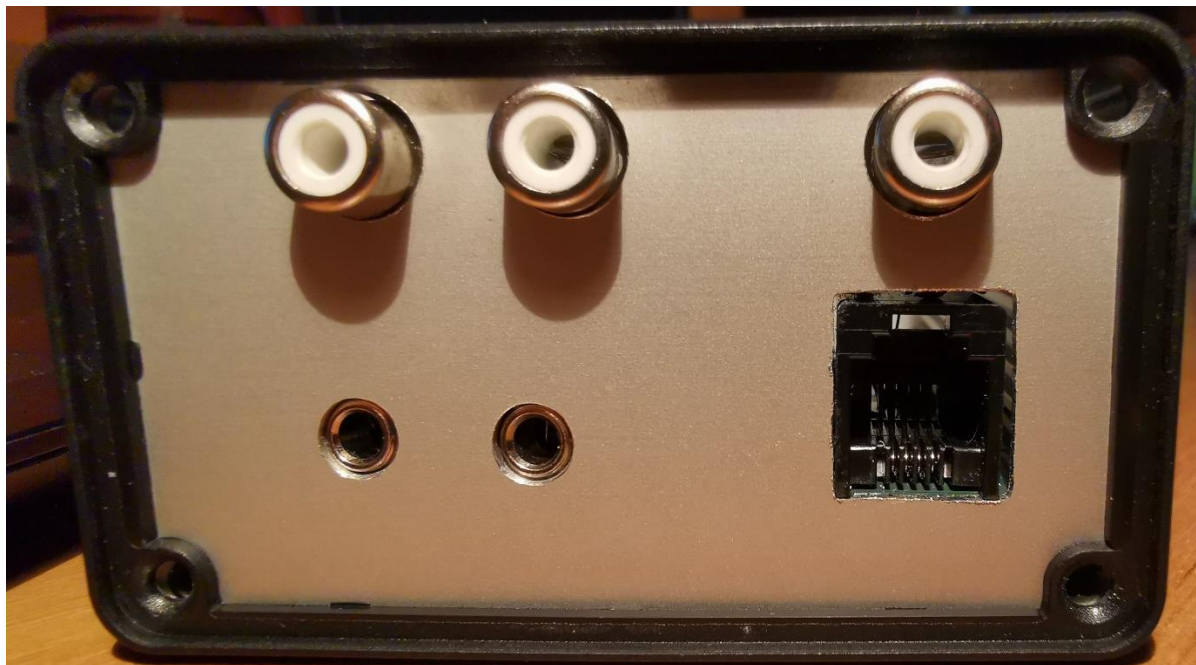
Při samotném osazování plošného spoje a následném testování vznikly problémy, které jsem řešil použitím drátových součástek připájených na kontakty. Největší problém jsem řešil při oživení mikrofonního zesilovače. Zjistil jsem, že je zesilovač potencionálně zranitelný na vstupech kdy rozdílové napětí mezi invertujícím vstupem a výstupem nemůže být větší než 0,7 V. Použil jsem toho zapojení dvou paralelních diod vůči vstupu. Při dalším testování bylo potřeba ještě oba vstupy přes odpor 10k Ω uzemnit. Toto zapojení ovšem zvyšuje výstupní úroveň šumu. Tato opatření jsou vidět na Obrázek 20: Ochrana vstupu.



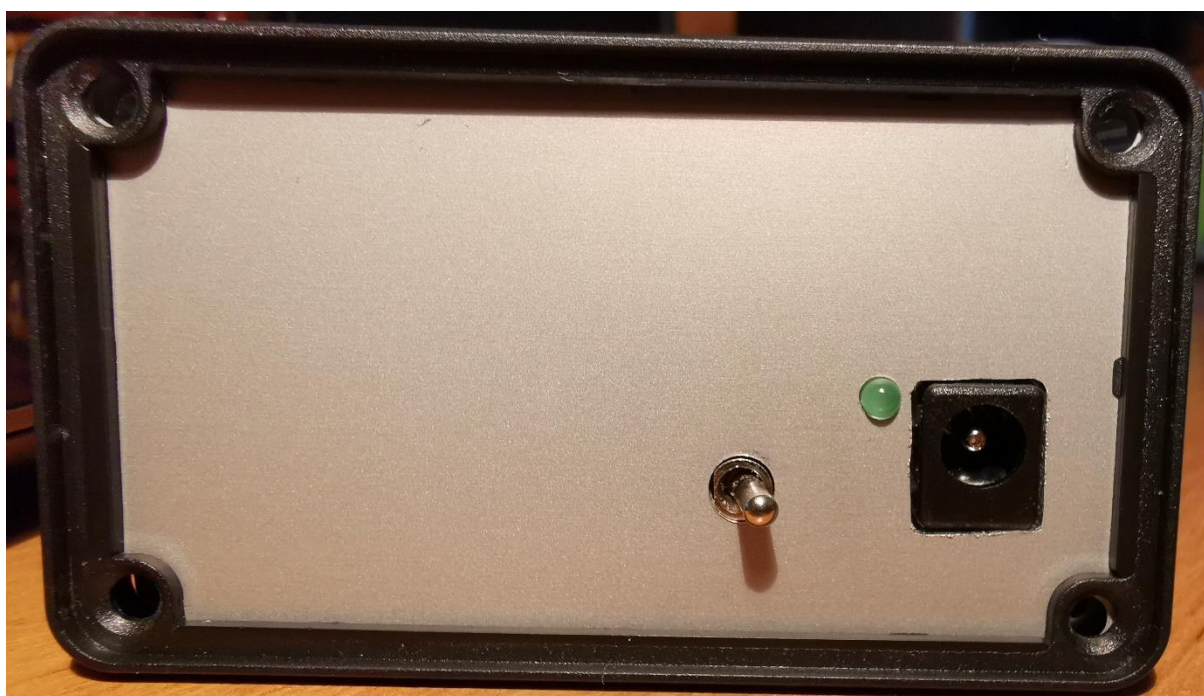
Obrázek 20: Ochrana vstupu

8.2 Vložení do krabičky a úprava čelního panelu

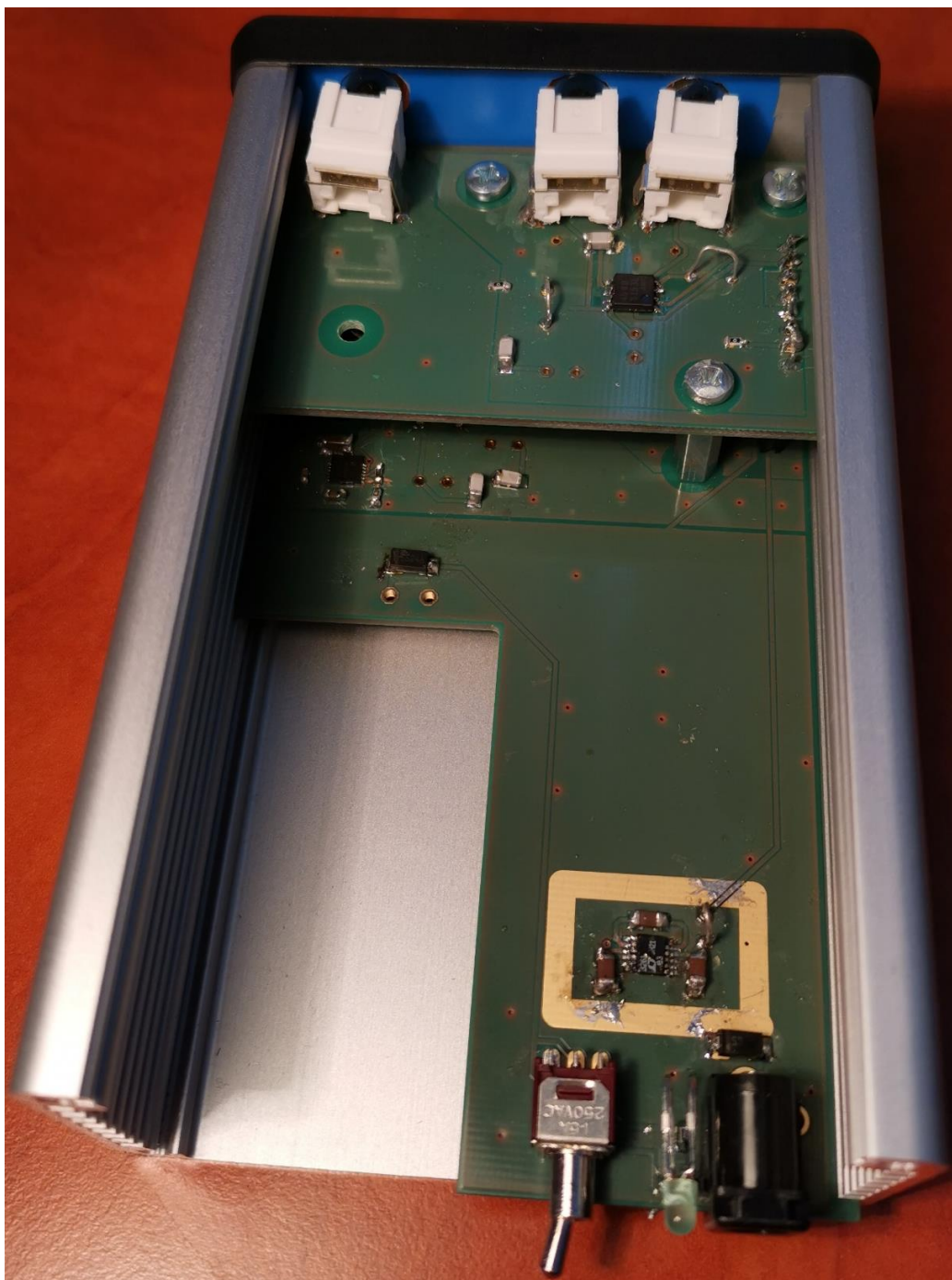
Do čelního a zadního panelu jsem vyvrtal díry, aby konektory mohly projít panelem skrz. Na Obrázek 23: Zasazení do krabičky jsou vidět obě patra spojená distančními sloupky a vložená do kovové krabičky.



Obrázek 21: Čelní panel



Obrázek 22: Zadní panel



Obrázek 23: Zasazení do krabičky

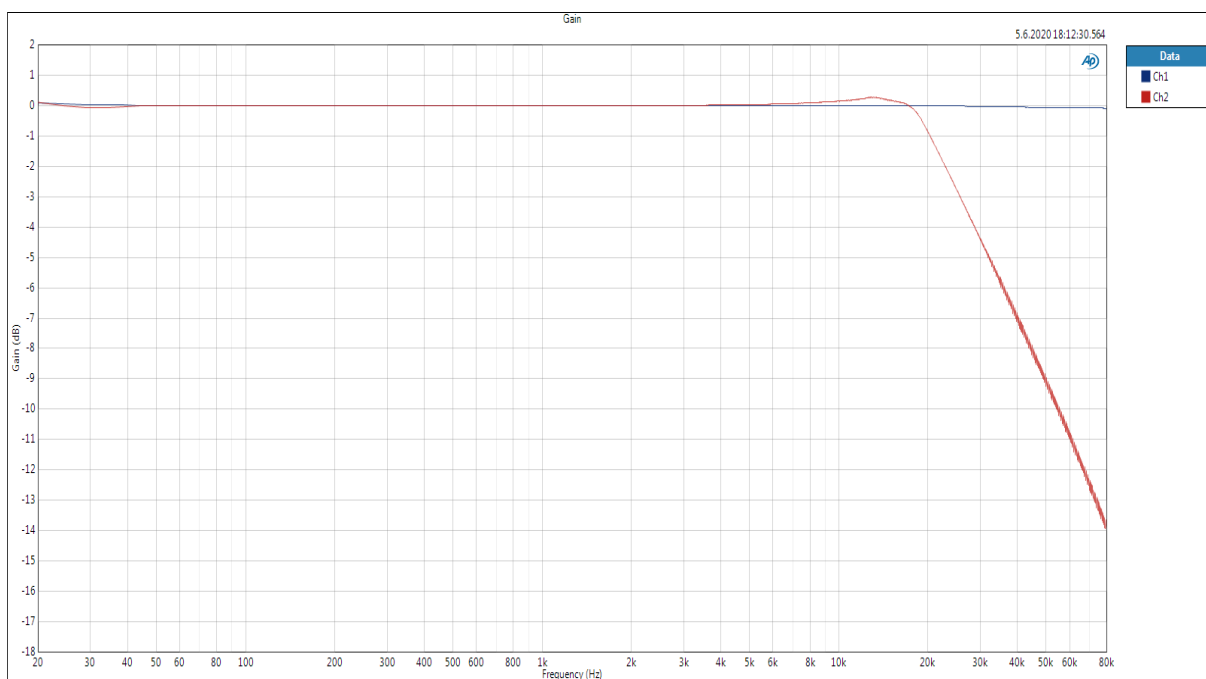
9 Měření pomocí analyzátoru Audio Precision APx525.

V této kapitole jsou grafy jednotlivých měření zesilovačů na analyzátoru Audio Precision APx525 a jejich porovnání s teoretickými hodnotami, které byly zadány v doporučení.

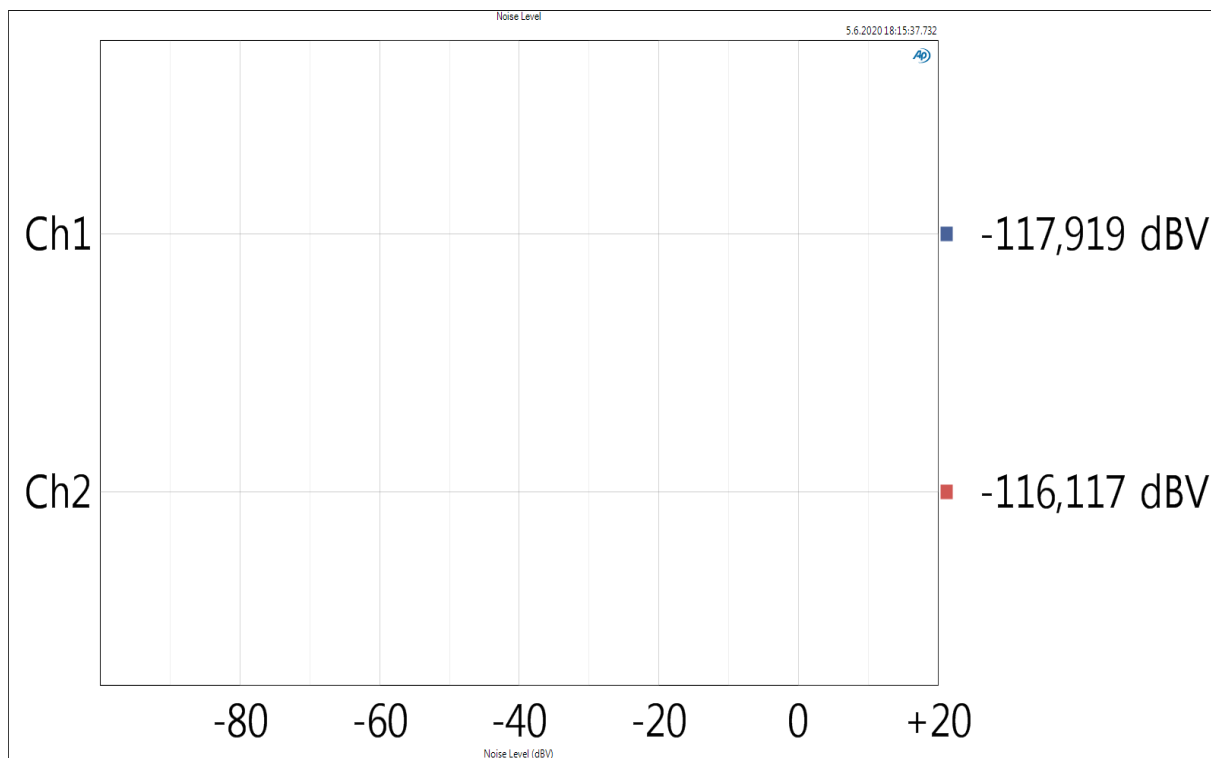
9.1 Měření sluchátkového předzesilovače

Měření proběhlo na analyzátoru audio precision APx525. Bylo měřeno při hodnotě 100mVrms v rozsahu 20 Hz do 80kHz a čas frekvenčního sweepu byl 350 ms. Toto měření bylo provedeno na prázdko. V této kapitole můžeme vidět změřené grafy, frekvenční charakteristiku, úroveň šumu.

Při porovnání s teoretickými hodnotami v doporučení ITU-T REC. P381 (08/2012) jsou naměřené hodnoty dostatečné jen částečně. Z grafu Obrázek 24:změřená frekvenční charakteristika sluchátkového zesilovače vidíme vyrovnanou frekvenční charakteristiku pro jeden kanál, druhý kanál má útlum na 20kHz. Změřená úroveň výstupního šumu je -117 dBV pro každý kanál.



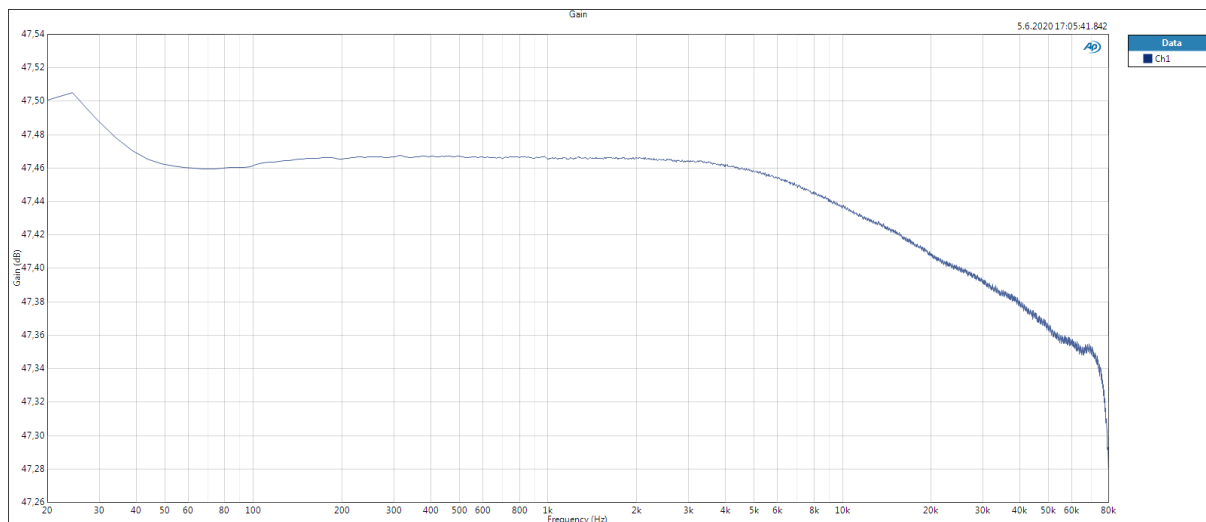
Obrázek 24:změřená frekvenční charakteristika sluchátkového zesilovače



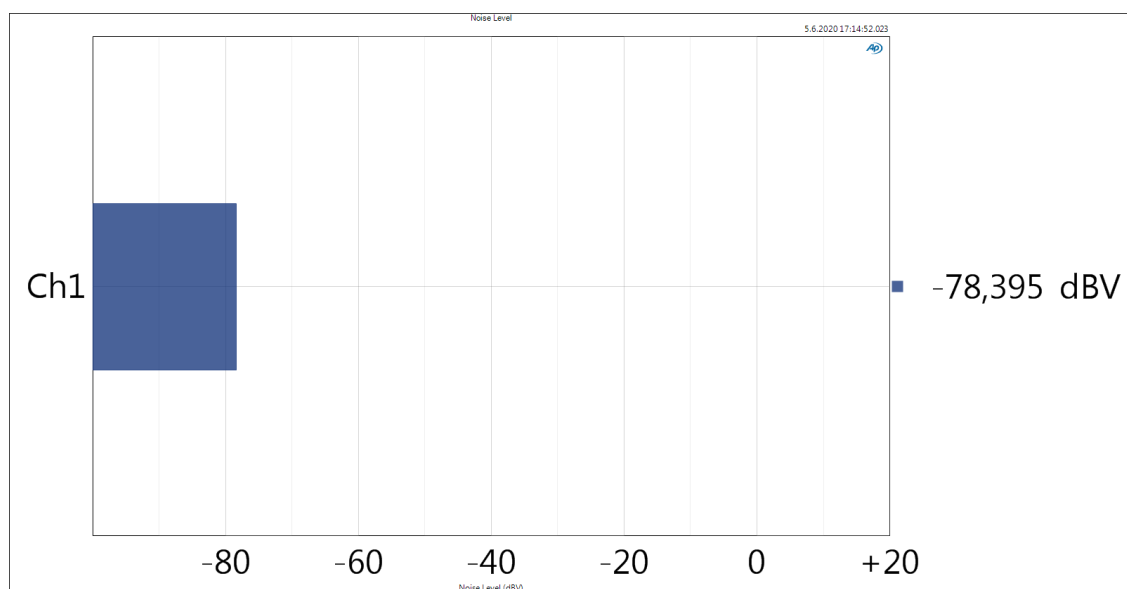
Obrázek 25: změřená výsledná úroveň výstupního šumu sluchátkového zesilovače

9.2 . Měření mikrofonního předzesilovače

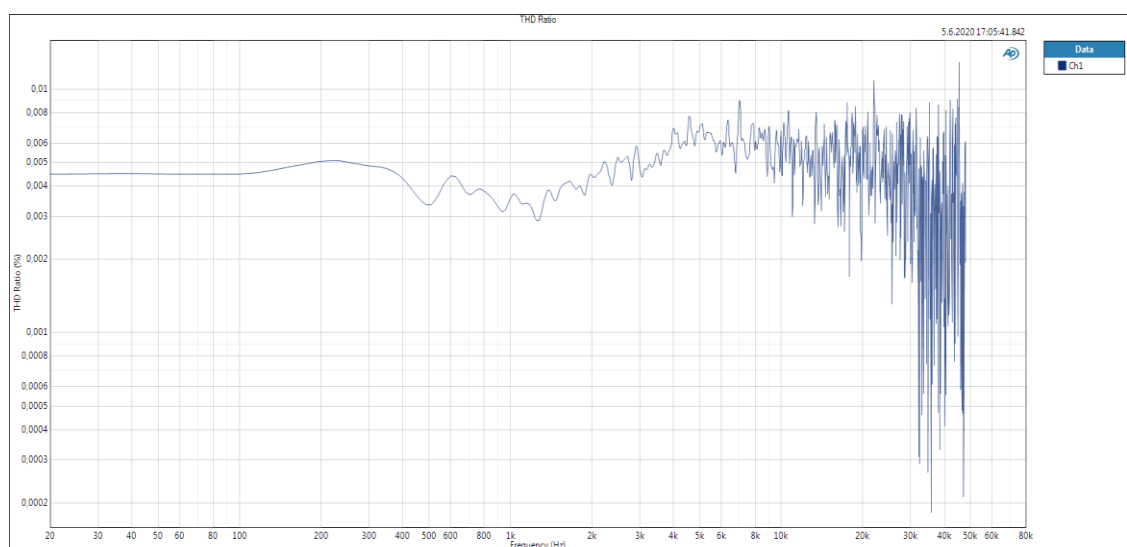
Při měření mikrofonního zesilovače byla úroveň vstupního napětí nastavena na 3.150 mVrms v rozsahu 20 Hz až 80 kHz, a čas frekvenčního sweepu byl 350ms. V této kapitole můžeme vidět frekvenční charakteristiku a výslednou změřenou úroveň šumu, která je -80 dBV . Tato hodnota není dostatečná podle zadání. Myslím, že zvýšený šum je kvůli ochranným diodám na vstupu. Poslední graf je změřené harmonické zkreslení, které se drží na úrovni 0.0045 % do 5kHz, potom stoupne na 0.006 %. Tato měření byla provedena na prázdko.



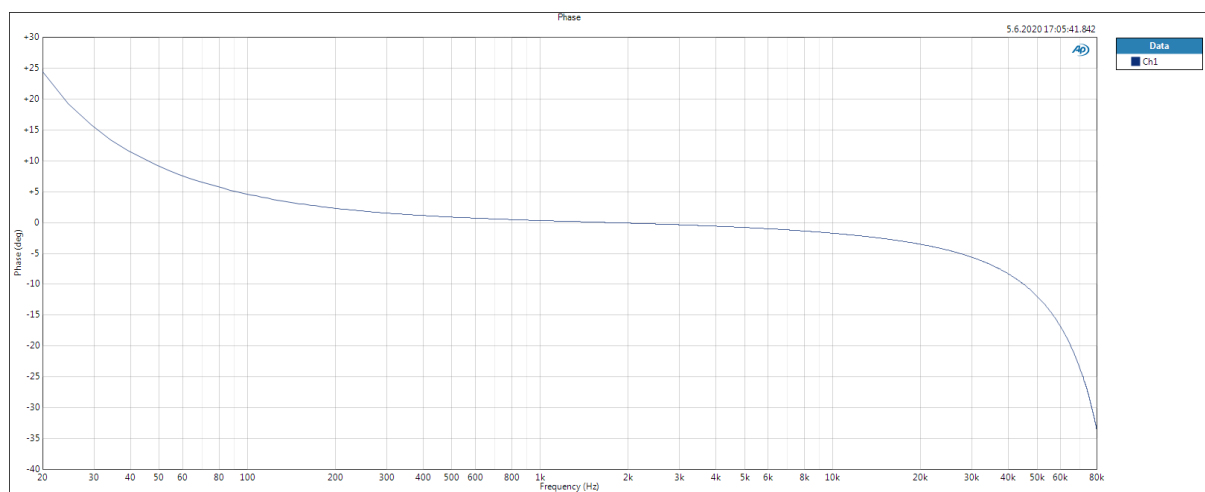
Obrázek 26: frekvenční charakteristika mikrofonního zesilovače



Obrázek 27: Výsledná úroveň šumu mikrofonního zesilovače



Obrázek 28: Harmonické zkreslení mikrofonního zesilovače



Obrázek 29: fázová charakteristika mikrofonního zesilovače

10 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout měřící audio předzesilovač pro komunikátor. Zařízení má sloužit při laboratorní výuce. V první části bakalářské práce je rozebrána teorie operačních zesilovačů, jeho možná známá zapojení, která jsou využita i v této práci.

V následující kapitole byly navrženy dva nízkošumové předzesilovače. Vysvětlení principu jednotlivých typů předzesilovačů, a jsou zde rozebrány typy šumu a jejich vlastnosti v elektrických obvodech a jak je co nejlépe potlačit. Pracoval jsem i s výpočtem šumu v operačních zesilovačích a jejich zapojení.

V další části bakalářské práce se zaměřuji na samotný návrh předzesilovačů a výběr součástek na základě předchozích teoretických znalostí. Navrhl jsem jeden předzesilovač pro mikrofon se zesílením $A=250$, kdy jsem vybral zesilovač AD797, a druhý pro sluchátka se zesílením 1 které mají za úkol dodat dostatečný výkon do sluchátek, kdy jsem vybral dvojici zesilovačů NE5532. S oběma těmito zesilovači lze dosáhnout nízkého šumu -90 dBV. V zadání je také ochrana na vstupu proti přepólování, to je vyřešeno ultra nízko napěťovými schottkyho diodami na vstupech. Signálové vstupy jsem ošetřil vysokofrekvenčními filtry proti procházení vysokofrekvenčních signálů. Deska plošného spoje je navržena v prostředí EAGLE.

Popsal jsem v bakalářské práci všechny problémy, které vznikly při osazování. Většina z nich byla způsobena mojí nedostatečnou zkušeností s konstrukcí podobných zařízení.

Poslední kapitola je věnována měření audio parametrů na analyzátoru APx 525. Při měření sluchátkového zesilovače jsem zjistil, že jeden kanál nefunguje podle zadání. První kanál má sice vyrovnanou frekvenční charakteristiku, ale frekvenční charakteristika druhého kanálu padá na 18 KHz. Po odevzdání práce zkusím vyměnit zesilovač za jiný a tento problém vyřešit. Při měření mikrofonního zesilovače jsem zjistil, že úroveň výstupního šumu je -80 dBV to je ovšem nedostatečné, neboť v zadání je požadavek na -90 dBV. Tento problém vzniká ochrannými diodami a rezistory připojenými na vstup zesilovače. V tomto stavu je pro svojí aplikaci přípravek nepoužitelný.

Seznam použité literatury

- [1] P.381: Technical requirements and test methods for the universal wired headset or headphone interface of digital mobile terminals [online]. [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-P.381-201208-S/en>
- [2] SELF, D. Small Signal Audio Design. Focal Press, 2010. ISBN 978-0-240-52177
- [3] AD797 [online]. [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD797.pdf>
- [4] NE5532x, SA5532x Dual Low-Noise Operational Amplifiers. *NE5532x, SA5532x Dual Low-Noise Operational Amplifiers datasheet (Rev. J)* [online]. [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ne5532.pdf?ts=1591530745077&ref_url=https://www.google.com/Https://cz.farnell.com/vishay/vs-10bq015hm3-5bt/schottky-rect-aec-q101-15v-do/dp/2889265 [online]. [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/95722/vs-10bq015hm3.pdf>
- [5] [Https://www.analog.com/en/products/ad797.html](https://www.analog.com/en/products/ad797.html) [online]. [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD797.pdf>
- [6] [Https://www.analog.com/en/products/ltc3261.html#product-overview](https://www.analog.com/en/products/ltc3261.html#product-overview) [online]. [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3261fb.pdf>
- [7] *LP38798 800 mA Ultra-Low-Noise, High-PSRR LDO datasheet (Rev. F)* [online]. [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3261fb.pdf>
- [8] *Schottky Diodes & Rectifiers Schottky – SMB-e3* [online]. [cit. 2019-12-19]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/427/vs-10bq015hm3-1074219.pdf>

